ChinaXiv合作期刊

第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

沙地盐胁迫对油莎豆幼苗生理生长影响的模拟研究

马兴羽[1,2,3,4]， 黄彩变[1,2,3]， 曾凡江[1,2,3]， 李向义[1,2,3]， 张玉林[1,2,3,5]， 丁 雅[1,2,3,5]，
高艳菊[1,2,3,4]， 徐梦琪[1,2,3,4]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆荒漠植物根系生态与植被修复重点试验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点试验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站，新疆 策勒 848300；
4. 中国科学院大学，北京 100049；5. 新疆大学，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘 要：为了解油莎豆（*Cyperus esculentus*）幼苗对沙化土地盐胁迫的生理生长适应性，本研究在温室条件下以风沙土为培养基质，采用盆栽试验对油莎豆幼苗进行不同浓度NaCl胁迫处理，分析盐胁迫30 d和50 d后油莎豆幼苗的生长、生理生化特性及Na^+和K^+平衡。结果表明：（1）盐胁迫30 d和50 d后，油莎豆幼苗地上和地下部分均在NaCl浓度≤0.5 g·kg^{-1}时生长良好，但株高明显降低；在NaCl浓度≥1.0 g·kg^{-1}时，地上及地下部干重、株高和叶面积均出现不同程度下降。（2）盐胁迫30 d时主要通过脯氨酸大量积累来减轻盐胁迫，在50 d时主要通过可溶性蛋白和可溶性糖的大量累积来提高其渗透调节能力以适应盐胁迫。（3）随NaCl浓度的增加，叶片与根系Na^+含量和Na^+/K^+均显著增加，说明其离子平衡遭到破坏。（4）隶属度综合评价结果表明，NaCl浓度≤0.5 g·kg^{-1}时油莎豆幼苗的综合生理生长表现没有发生明显变化，但超过1.0 g·kg^{-1}时则显著下降，这表明油莎豆幼苗具有一定的耐盐性，在沙地轻度盐胁迫条件下可以正常生长。

关键词：油莎豆；盐胁迫；幼苗生长；渗透调节；离子含量

我国目前有各类可利用盐渍土面积达3.69×10^7 hm^2，其中具有农业利用前景的盐渍土面积约6.7×10^6 hm^2[1-2]。新疆是我国盐渍化最严重的地区之一，可占到全国盐渍土总面积的22.01%[3]，主要为绿洲和沙化盐渍土，是我国目前具有较好农业开发价值、具备农业改良利用潜力的盐渍土地之一。有效治理开发可利用盐渍土地，不但可以有效扩增区域耕地资源，拓展农业发展空间[4]，还可缓解粮食安全压力。引进和种植耐盐植物可显著增加土壤有机质和生物多样性，对盐渍化土壤微生态环境也具有显著改善作用[2]，因此，引进适宜于盐渍化土地生长的植物，尤其是综合利用价值较高作物，是盐渍化土地改良利用和土地生产力提高的重要措施之一。油莎豆（*Cyperus esculentus*）是莎草科莎草属多年生草本植物（在农业生产上作为一年生作物栽培），是一种集粮、油、牧、饲、药、绿化观赏于一体的高产经济作物，具有抗逆性强、适应性广、耐瘠薄等特性[5-6]，近年来在新疆南北部绿洲和风沙区均已试种成功[7-8]。但是关于油莎豆能否在沙化且有不同程度盐渍化的土地上成功种植还了解较少，且缺乏对油莎豆在沙化盐渍土地规模化种植的有效的理论指导。因此，研究沙化土地油莎豆对盐胁迫的响应及适应机制，对其在新疆沙质盐渍土地进行规模化种植和土地高效利用方面具有重要意义。

盐胁迫对植物生长发育的伤害主要通过渗透胁迫、离子毒害、营养失衡和氧化损伤等次生反应过程来实现[9-10]。为适应盐胁迫，植物已进化出一系列生理生化保护机制，如通过渗透调节物质的合成、抗氧化酶活性的提高及耐盐基因的上调表达等一系列的响应机制来进行自我调节和缓解[11-13]。不同植物的耐盐机制和响应机制也不同，如耐盐小麦（*Triticum aestivum*）幼苗通过其较强的K^+/Na^+、Ca^{2+}/

收稿日期：2022-05-21； **修订日期**：2022-07-15
基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFC0507603-01）资助
作者简介：马兴羽（1997-），男，硕士研究生，主要从事植物生态学研究. E-mail: mxy20200607@126.com
通讯作者：黄彩变. E-mail: huangcaibian@ms.xjb.ac.cn

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00138v1

Na^+调节能力和抗氧化酶体系缓解盐胁迫[14];藜麦(*Chenopodium quinoa*)幼苗采取提高体内可溶性糖和脯氨酸含量,增强抗氧化酶活性,降低丙二醛(MDA)含量等自我保护机制以适应盐胁迫[15];小报春(*Primula forbesii*)幼苗可通过提高可溶性蛋白和脯氨酸含量及超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性来抵御盐害[16];唐榕等[17]对以蛭石为培养基质油莎豆幼苗在短时间内的耐盐性进行研究,也发现其可通过提高叶片内抗氧化酶活性、积累脯氨酸与可溶性糖等来提高其耐盐能力。但是延长胁迫时间,油莎豆幼苗是否仍有较强的耐盐能力尚不明确。为此,本研究以塔里木盆地南缘绿洲-荒漠过渡带的风沙土为培养基质,在温室大棚内采用盆栽试验,通过监测油莎豆幼苗在不同盐胁迫时间和盐浓度下植株的生长表现、Na^+和K^+含量,以及叶片有机渗透调节物质累积和MDA含量变化等,分析油莎豆幼苗对沙化土壤盐胁迫的生长生理响应及耐盐性,以期为油莎豆在新疆沙质盐渍土地的大面积推广种植提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　材料培养与处理

试验在新疆乌鲁木齐植物园温室大棚中进行(43°53′N, 87°33′E),供试油莎豆品种为新科1号,前期进行种子萌发预实验,种子萌发率达90%。播种前挑选籽粒饱满、无霉化、无机械损伤,且大小均一的种子放入蒸馏水中浸种48 h备用。供试土壤采集于塔里木盆地南缘策勒绿洲-沙漠过渡带0~30 cm土层,土壤类型为风沙土,pH为8.81,盐分含量为0.108%,有效磷含量为0.9 $mg \cdot kg^{-1}$,碱解氮含量为2.16 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾含量为128 $mg \cdot kg^{-1}$。K^+含量为4.40 $mg \cdot kg^{-1}$,Na^+含量为7.44 $mg \cdot kg^{-1}$。据调查油莎豆在新疆的种植时间一般在4月下旬至5月下旬,该时段气温还不是很稳定,平均气温不超过15 ℃[18]。因此,幼苗生长期间,温室日平均温度控制在15.64±1.74 ℃,平均湿度为68.18±7.93%,日平均光照度为9089.54 ±3399.09 lux,日照时长为10 h。

于2021年9月10日,将风干处理后的土壤装入高34 cm、上口径23 cm、下口径20 cm的塑料花盆中,每盆装土重10 kg,盆下垫托盘,以便后期浇水时渗漏液被再次吸收利用。次日施肥和播种,每盆基施尿素0.08 $g \cdot kg^{-1}$,磷酸二氢钾0.12 $g \cdot kg^{-1}$,之后每盆播入3粒种子,随后灌入300 mL水。待油莎豆植株生长至三叶一心时(播种后20 d)开始间苗,每盆留苗1株,且生长情况基本一致。于10月2日开始盐胁迫处理,土壤盐胁迫梯度参照黄绍文等[19]依据Cl^-含量划分的盐渍化程度分级标准(表1),共设置5个NaCl浓度梯度,分别为对照(0 $g \cdot kg^{-1}$, CK),轻度盐分胁迫(0.5 $g \cdot kg^{-1}$, S_1),中度盐分胁迫(1.0 $g \cdot kg^{-1}$, S_2),重度盐分胁迫,(2.0 $g \cdot kg^{-1}$, S_3),盐土(3.5 $g \cdot kg^{-1}$, S_4),每个处理30盆,共150盆。为避免盐基效应,S_1、S_2和S_3处理按每日递增0.5 $g \cdot kg^{-1}$NaCl融入清水浇入土壤中,S_4处理按每日递增0.7 $g \cdot kg^{-1}$NaCl浇入土壤中,CK处理补入清水。经测量盆内土壤的田间持水量为18%,采用称重法补充水分,保持土壤含水量为田间持水量的75%。分别在播种后50 d和70 d(盐胁迫后的30 d和50 d)进行采样。

1.2　测定项目及方法

1.2.1　生长指标测定　在盐分处理30 d和50 d时测量油莎豆幼苗的株高,每个处理选15盆,记录并取平均值。之后每个处理随机选取3盆,每盆为1个重复,剪去所有叶片,带回实验室,用清水洗净并擦干,利用扫描仪(惠普G3110)扫描叶片,通过Image J软件计算叶面积。将油莎豆幼苗扫描叶片,地上部剩余部分和地下部分分别清洗后放入烘箱,在105 ℃下杀青30 min,随后在75 ℃烘干至恒重,并称量获得各部位干重。其中地上部分包括茎与叶,地下部分包括根系与块茎。根冠比计算公式如下[20]:

$$根冠比 = 地下部干重/地上部干重 \quad (1)$$

参照邹琦[21]的饱和称重法测定叶片相对含水量,每个处理另选3盆。选取油莎豆幼苗相同部位

表1　土壤盐渍化分级参考标准

Tab. 1　Classification standard of soil salinization

土壤盐渍化程度	非盐渍土	轻度盐胁迫	中度盐胁迫	重度盐胁迫	盐土
Cl^-含量/($g \cdot kg^{-1}$)	<0.20	0.20~0.40	0.40~1.00	1.00~2.00	≥2.00
NaCl含量/($g \cdot kg^{-1}$)	<0.3	0.33~0.66	0.66~1.65	1.65~3.30	≥3.30

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00138v1

的成熟叶片，保存于便携冰箱内，带回实验室，用蒸馏水迅速冲洗叶片表面，吸干表面水分后称其叶片鲜重，然后将叶片浸入15 mL试管中，加满蒸馏水（期间注意避免叶片损伤），使叶片完全浸入水中，在阴暗环境下浸泡24 h，将叶片取出并轻轻吸干表面水分。称取叶片饱和鲜重后，放入105 ℃烘箱中杀青30 min，75 ℃烘干至恒重，称取干重。利用下式计算油莎豆叶片的相对含水量：

$$相对含水量=\frac{鲜重-干重}{饱和鲜重-干重}\times 100\% \quad (2)$$

1.2.2 生理指标及离子含量测定 每个处理随机选取3盆，剪下成熟叶片，采用硫代巴比妥酸（TBA）显色法[22]测定MDA含量；脯氨酸含量参照李合生[23]的磺基水杨酸提取法测定；可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250比色法测定[24]。MDA、脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量均是按叶片鲜重计算。叶片和根系的Na^+、K^+含量参照王宝山等[25]的方法提取与测定，其含量均按干重计算。

1.3 耐盐性综合评价

根据盐胁迫后测定的油莎豆幼苗的指标（生长、生理生化指标和叶片Na^+、K^+含量），选用模糊隶属函数法分别计算盐胁迫30 d和50 d的油莎豆幼苗隶属函数值，数值越大表示耐盐性越强[15]，计算公式如下：

$$R=(X-X_{min})/(X_{max}-X_{min}) \quad (3)$$

$$R=(X_{max}-X)/(X_{max}-X_{min}) \quad (4)$$

式中：R为隶属函数值；X为各指标某一测定值；X_{min}为该指标的测定最小值；X_{max}为该指标的测定最大值。当耐盐性与指标呈正相关关系时，采用公式（3）计算，负相关时采用公式（4）计算。

1.4 数据统计分析

使用Microsoft Excel 2019软件进行数据处理，使用IBM SPSS statistics 23软件进行数据统计分析，应用单因素方差分析（One-Way ANOVA）及多重比较（Duncan）检验各生长及生理指标在不同盐浓度胁迫下的差异性（95%置信区间）。利用Person相关系数分析各指标间相关关系；采用Origin 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对油莎豆幼苗生长的影响

盐胁迫对油莎豆幼苗生长有显著影响（图1）。在盐胁迫处理30 d后，地上部分干重随盐胁迫程度加剧而明显下降（图1a），轻度盐分胁迫S_1处理与CK处理无明显差异，均显著高于其他处理；S_2和S_3处理差异也不明显，但显著高于S_4。地下部分干重在S_1处理下最高，与其他处理差异却不显著（图1b）。株高在盐分处理后也显著下降（图1c），S_1与S_2处理差异不明显，但显著高于S_3与S_4。叶面积对盐胁迫的响应与地上部分干重一致（图1d）。

在盐分处理50 d后，地上部分干重在S_1与CK间差异不明显，但均显著高于其他处理；S_3与S_4差异也不明显，均显著低于其他处理。地下部分干重在S_1处理下较CK下降了23.6%，但二者差异不明显，其他处理均显著低于CK。株高在盐分处理后均显著下降，在S_2处理下最低，但与S_3和S_4处理差异不显著。叶面积也在各盐分处理后显著下降，分别比CK处理降低了25.3%，65.8%，64.9%和72.6%。

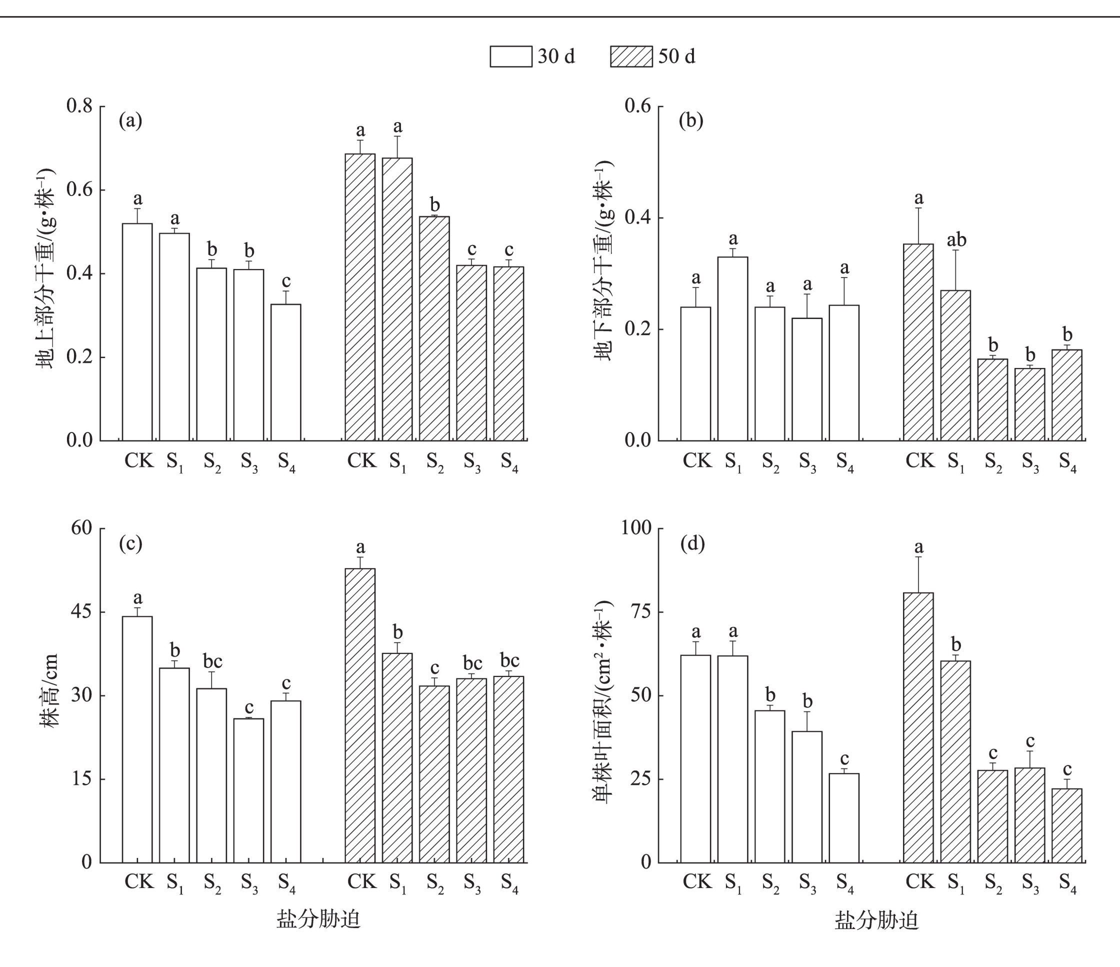
与盐胁迫30 d相比，在盐分处理50 d后同一处理的地上部分干重均有不同程度增加，CK~S_4处理分别增加了32.1%，36.2%，29.8%，2.4%和27.6%；地下部分干重除CK增加47.2%外，其他处理分别下降了18.2% ，38.9%，40.9%和32.9 %。CK~S_4处理的株高分别增加了19.5%，7.6%，1.5%，27.8%和15.1%。叶面积仅CK处理增加了30.1%，其余各处理叶面积下降幅度分别为2.5%，39.3%，27.8%和17.0%。

由图2可以看出，在盐分胁迫30 d后，叶片相对含水量在S_1处理下略有增加，且显著高于其他盐分处理（图2a）；不同盐分处理的根冠比均较CK有所增加，但不明显（图2b）。盐分胁迫50 d后，叶片相对含水量在S_1处理下最高，但与其他处理差异均不明显；根冠比在所有盐分处理下均出现下降，S_1与S_4处理下降不明显，但S_2与S_3显著低于CK。与盐分胁迫30 d相比，叶片相对含水量在CK与S_1处理下分别增加了2.4%和8.0%，其他盐分处理变化很小；除CK的根冠比在50 d时稍有增加，其他盐分处理均出现降低。

2.2 盐胁迫对叶片有机渗透调节物质的影响

2.2.1 盐胁迫下油莎豆叶片脯氨酸含量的变化 由图3a可以看出，在盐分处理30 d后，各盐分处理下叶片中脯氨酸含量均高于CK，其中S_1和S_2处理差异不明显，与其他各处理间差异也不明显；S_3和S_4处理差异也不明显，与CK相比分别显著提高了35.6%和40.5%。在盐分处理50 d后，叶片脯氨酸含量在S_1，

ChinaXiv合作期刊



注:不同小写字母表示在$P<0.05$水平上差异显著。下同。

图1 不同盐分梯度下油莎豆幼苗干物质、株高和叶面积的变化

Fig. 1 Changes in dry matter, plant height and leaf area of *Cyperus esculentus* seedlings under different salt stress treatments

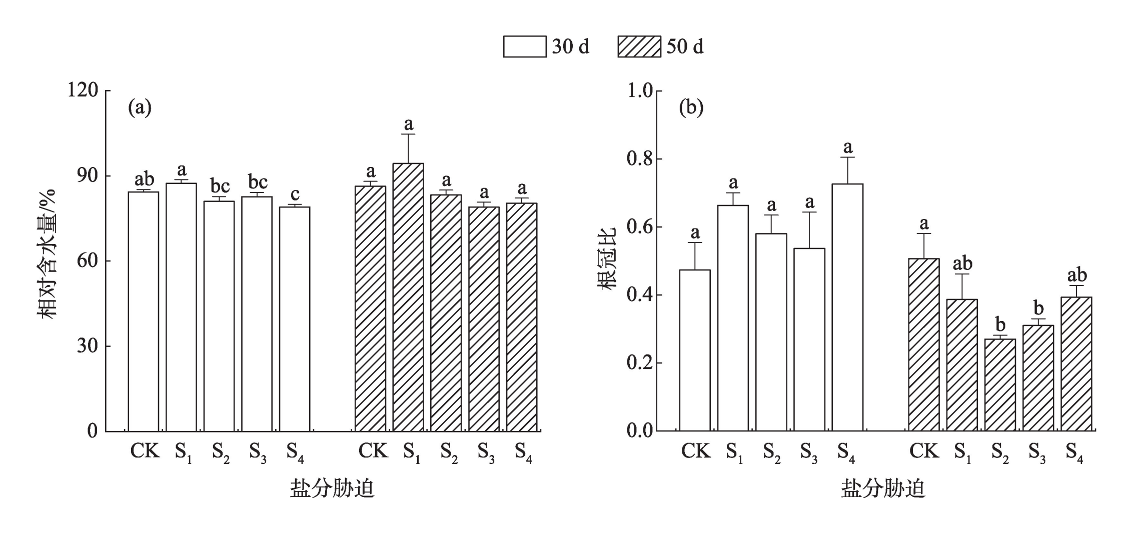


图2 不同盐分梯度下油莎豆幼苗的叶片相对含水量及根冠比变化

Fig. 2 Changes in leaf relative water content and root-shoot ratio of *C. esculentus* seedlings under different salt stress treatments

S_2和S_3处理下差异不明显,分别比CK降低了24.6%,18.3%和23.2%。脯氨酸含量在S_4处理下最高,且显著高于其他处理。与盐胁迫30 d相比,盐分处理50 d后,CK和S_4处理的脯氨酸含量分别增加了19.4%和11.3%;S_1,S_2和S_3处理分别降低了20.3%,14.6%和32.4%。

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

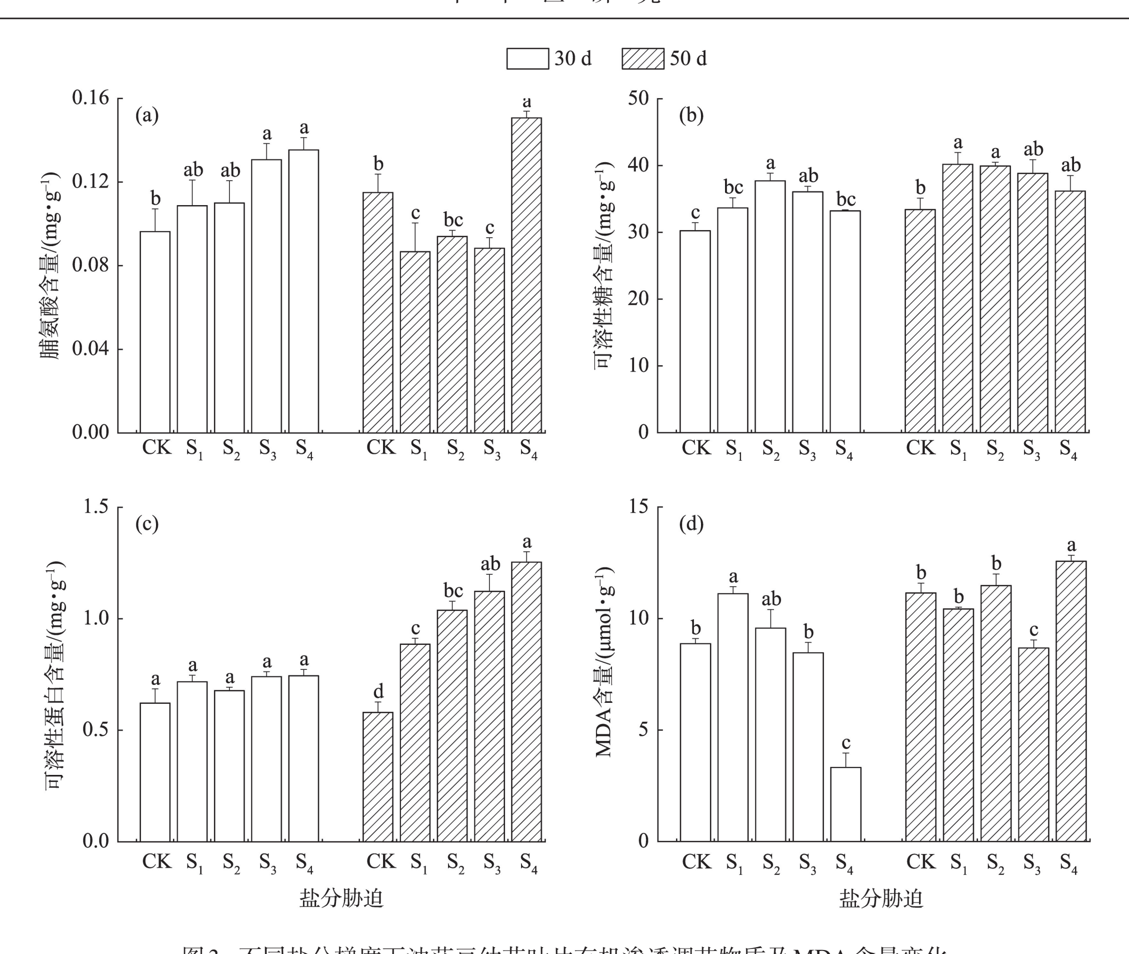


图3　不同盐分梯度下油莎豆幼苗叶片有机渗透调节物质及MDA含量变化

Fig. 3　Changes in organic osmotic regulatory substances and MDA contents of *C. esculentus* seedlings leaves under different salt stress treatments

2.2.2　盐胁迫下油莎豆叶片可溶性糖含量的变化　在2个胁迫时间，叶片可溶性糖含量均随盐分胁迫加剧呈先升高后降低的趋势（图3b）。在盐分处理30 d后，S_2处理的可溶性糖含量最高，与S_3处理差异不明显，但显著高于其他处理。在盐胁迫处理50 d后，各盐分胁迫处理间差异不明显，但S_1和S_2分别比CK显著增加20.3%和19.5%，而S_3和S_4处理略高于CK 16.2%和8.3%。盐分胁迫50 d后，各处理叶片可溶性糖含量均比30 d有所升高，S_1处理增加最多为19.3%。

2.2.3　盐胁迫下油莎豆叶片可溶性蛋白含量的变化　由图3c可以看出，各盐分处理的可溶性蛋白含量均高于CK。盐胁迫处理30 d后，叶片可溶性蛋白含量随盐分胁迫加强略有上升，但各处理间差异却不显著。盐胁迫50 d后，各盐分处理的可溶性蛋白含量均显著高于CK，并随盐胁迫程度增加而显著上升。与盐胁迫30 d相比，在盐胁迫50 d后除CK处理下可溶性蛋白含量降低了6.7%，S_1~S_4分别增加了23.5%，53.2%，51.6%和68.4%。

2.3　盐胁迫下油莎豆叶片MDA含量的变化

在盐分胁迫30 d后，叶片MDA含量随盐分胁迫程度加剧先升高而后降低（图3d）。MDA含量在S_1处理下最高，显著高于CK 25.2%，S_2和S_3处理与CK差异不明显，S_4处理显著低于其他处理，较CK显著下降62.6%。在盐分胁迫50 d后，S_1和S_2处理的MDA含量与CK没有明显差异，在S_3处理下显著下降，并在S_4处理下又升至最高，较CK处理显著提高了12.7%。与盐胁迫处理30 d后相比，S_1处理在盐分处理50 d后降低了6.2%，其他处理均有不同程度增加，其中S_4处理增加了278.2%。

2.4　盐胁迫对油莎豆植株中的Na^+、K^+、Na^+/K^+比的影响

2.4.1　盐胁迫下油莎豆叶片Na^+、K^+、Na^+/K^+比的变化　由图4a可以看出，油莎豆叶片K^+含量随盐胁迫

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00138v1

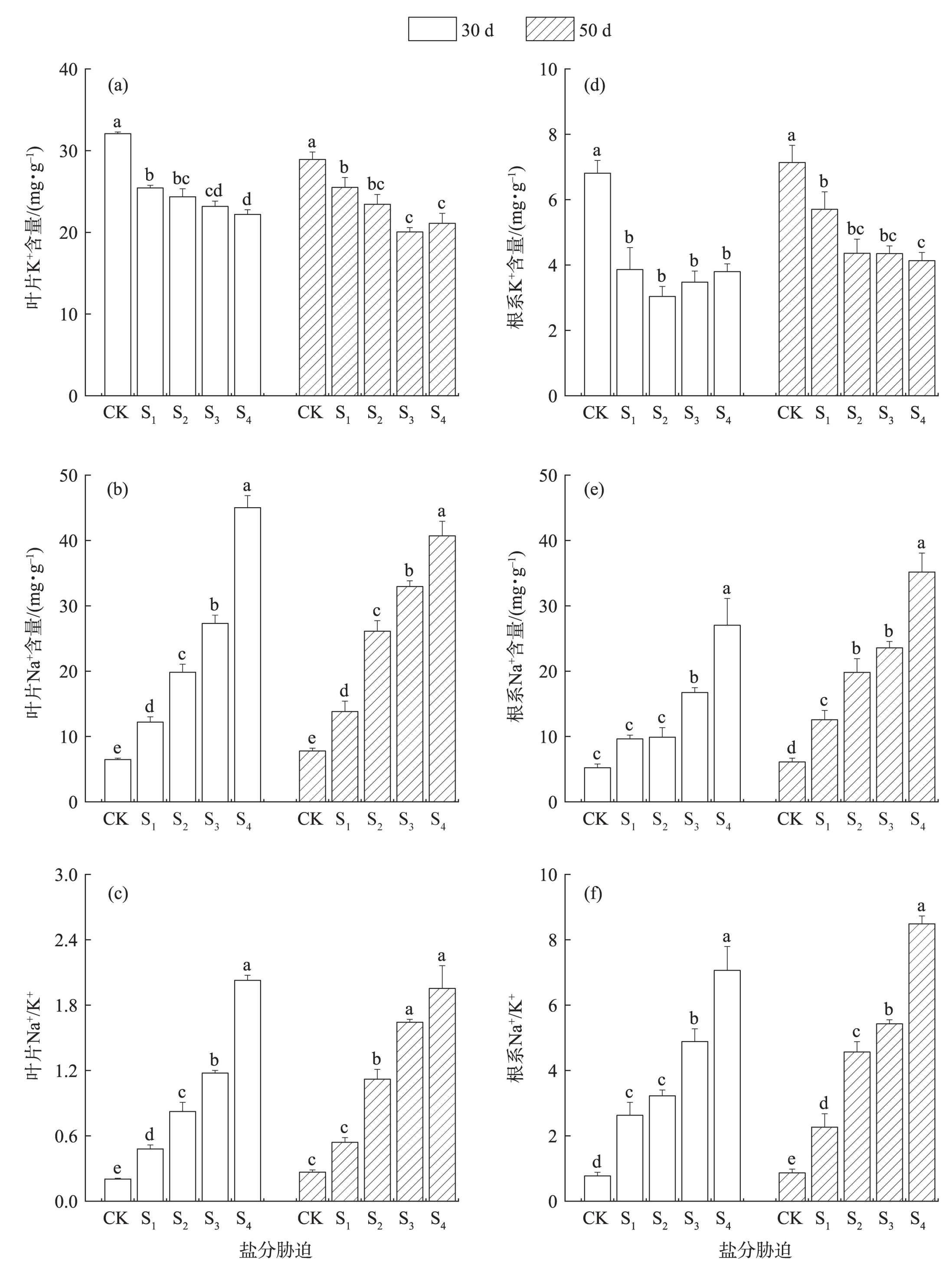


图4 不同盐分梯度下油莎豆幼苗叶片和根系Na^+和K^+含量及Na^+/K^+比值变化

Fig. 4 Changes in Na^+ and K^+ contents and Na^+/K^+ ratio in leaves and roots of *C. esculentus* seedlings under different salt stress treatments

程度加剧而下降。在盐分处理30 d后,K^+含量在4个盐分处理下均显著低于CK,分别较CK降低了20.7%,24.1%,27.8%和30.9%。Na^+含量和Na^+/K^+比均随盐分胁迫程度增加而显著增加,在S_4处理下显著高于其他处理(图4b,图4c)。在盐分胁迫处理50 d后,叶片K^+含量在各浓度盐分处理下均显著降低,S_1~S_4处理分别比CK下降了11.9%,19.0%,30.7%和27.0%。Na^+含量和Na^+/K^+比均随盐胁迫加剧而显著增加。

与盐胁迫30 d相比,S_1处理的叶片K^+含量在盐

ChinaXiv合作期刊

分胁迫50 d后提高了0.3%，CK和S_2~S_4处理分别下降了9.8%，3.8%，13.5%和4.9%。Na^+含量除在S_4处理下降了9.6%，其他各处理均有不同程度增加。CK，S_1，S_2和S_3处理的叶片Na^+/K^+比分别增加了31.2%，12.5%，36.0%和39.7%；S_4处理却降低了3.6%。

2.4.2 盐胁迫对油莎豆根系Na^+、K^+、Na^+/K^+比变化的影响 由图4d可以看出，在盐分处理30 d后，S_1~S_4处理的根系K^+含量分别比CK减少了43.3%，55.4%，49.0%和44.3%，各盐分处理间差异不显著。Na^+含量和Na^+/K^+比随盐分梯度增加而显著上升，在S_1和S_2处理下差异不明显（图4e，图4f）。盐分处理50 d后，各盐分处理的根系K^+含量均显著低于CK，S_1与S_2，S_3处理之间差异均不显著，但显著高于S_4处理。Na^+含量和Na^+/K^+比随盐分胁迫加剧而显著增加，其中S_2和S_3处理之间差异不明显，但显著低于S_4处理。根系随盐分浓度升高而增加，在S_4处理下达到最大，且显著高于其他处理。

与盐分胁迫30 d相比，盐分胁迫50 d后，CK和S_1~S_4处理的根系K^+含量分别升高了4.8%，47.6%，43.6%，25.1%和8.8%。Na^+含量在各处理下也分别提高了16.9%，30.4%和100.3%，40.9%和30.1%。根系Na^+/K^+比在S_1处理下略有降低，其他处理下分别升高了12.1%，41.7%，11.1%和20.2%。

2.5 不同浓度盐胁迫下油莎豆的隶属函数值及耐盐性评价

采用隶属函数法对油莎豆的耐盐能力特性进行综合评价（表2）。在2个胁迫时间，油莎豆的隶属函数值大小顺序均是：CK>S_1>S_2>S_3>S_4。由图5看出，在盐胁迫30 d和50 d后在轻度盐分胁迫处理S_1的耐盐性综合评价值与CK差异均不显著，但显著高于其他盐分处理。盐胁迫30 d的综合评价值随胁迫程度加剧而显著下降，而在盐胁迫50 d后S_2，S_3和S_4却差异不明显。

3 讨 论

3.1 盐胁迫对油莎豆生长的影响

植物遭受盐损伤会出现植株矮小，叶面积减少，根系生物量下降等现象[15,26]，但不同植物的响应不同，耐盐程度也有差异。对湖南稷子（*Echinochloa frumentacea*）[27]、冰草（*Agropyron cristatum*）[28]等植物研究均发现，低盐胁迫可促进株高和生物量累积的增加，而高盐浓度则起到抑制作用。本研究表明，轻度盐分胁迫（S_1）30 d后对油莎豆地上部干重和叶面积没有明显影响，对地下部干重略有促进，但株高显著下降。随盐胁迫时间延长，S_1处理的地上部干重受影响仍较小，但其株高、叶面积均显著下降，且地下部干重也受到抑制。在中度和重度盐胁迫下，油莎豆地上和地下干重、株高及叶面积均遭到明显抑制。这表明短期内低盐胁迫不会对油莎豆产生负面影响，但胁迫时间过长则会抑制地下部生长和光合叶面积的扩大。豆昕桐等[14]对小麦幼苗的研究也发现，不同程度盐胁迫短时间对小麦幼苗生长有一定的促进作用，但随着胁迫时间的增加，幼苗的生长则会受到抑制。这说明除了盐胁

表2 不同盐分梯度下油莎豆的隶属度函数值及耐盐性评价

Tab. 2 Subjection values and salt tolerance evaluation of *C. esculentus* under different salt stress treatments

处理时间/d	NaCl胁迫处理	地上部分干重/(g·株$^{-1}$)	地下部分干重/(g·株$^{-1}$)	株高/cm	单株叶面积/(cm^2·株$^{-1}$)	相对含水量/%	脯氨酸/(mg·g^{-1})	可溶性糖/(mg·g^{-1})	可溶性蛋白/(mg·g^{-1})	MDA/(μmol·g^{-1})	K^+/(mg·g^{-1})	Na^+/(mg·g^{-1})	Na^+/K^+	隶属函数平均值	排序
30	CK	0.79	0.45	0.86	0.82	0.53	0.81	0.18	0.36	0.30	0.96	0.99	0.99	0.67	1
	S_1	0.72	0.89	0.44	0.81	0.79	0.61	0.48	0.71	0.07	0.38	0.86	0.85	0.63	2
	S_2	0.45	0.43	0.27	0.46	0.24	0.59	0.83	0.56	0.23	0.29	0.68	0.67	0.47	3
	S_3	0.44	0.35	0.02	0.32	0.40	0.25	0.69	0.79	0.34	0.19	0.50	0.49	0.40	4
	S_4	0.18	0.46	0.17	0.04	0.10	0.17	0.44	0.81	0.88	0.10	0.08	0.05	0.29	5
50	CK	0.80	0.71	0.88	0.76	0.26	0.52	0.25	0.07	0.38	0.89	0.98	0.98	0.62	1
	S_1	0.77	0.45	0.30	0.52	0.47	0.19	0.77	0.45	0.52	0.57	0.81	0.84	0.56	2
	S_2	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	3
	S_3	0.07	0.03	0.13	0.13	0.08	0.22	0.67	0.74	0.87	0.07	0.28	0.29	0.30	4
	S_4	0.05	0.12	0.14	0.06	0.12	0.93	0.46	0.90	0.35	0.17	0.06	0.13	0.29	5

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

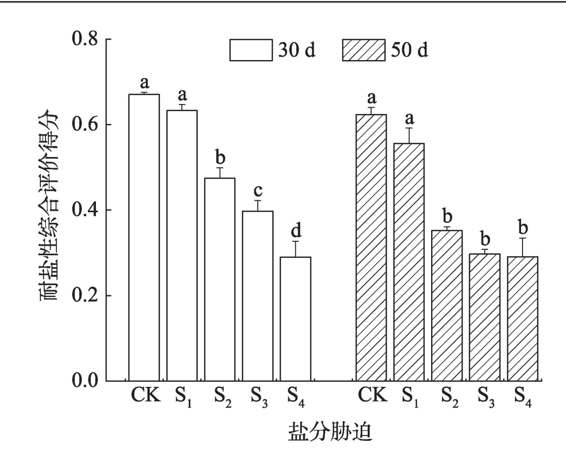


图5 油莎豆幼苗耐盐性综合评价得分

Fig. 5 Comprehensive evaluation scores of salt tolerance of *C. esculentus* seedlings

迫强度外,胁迫时间也会同样影响到油莎豆幼苗的生长。

很多研究认为,盐胁迫下植物根系生长的敏感性要高于地上部,在盐分浓度过大时会通过减缓根系生长[29-30],降低盐分的吸收,减少其向地上部的运输来防御盐害[31],因此在盐胁迫下植物根冠比会下降[20]。但也有研究认为,在盐胁迫下根系的敏感程度要低于地上部,植物通过增加生物量在根系的分配[32],以加强根对水分和养分的获取,因此其根冠比也会明显增加[33]。本研究表明,在盐胁迫30 d后,各盐分处理的根冠比均略有增加,但在盐胁迫50 d后,各盐分处理的根冠比均出现不同程度下降。这可能是由于油莎豆幼苗根系对盐胁迫的敏感性比较滞后,但是长时间的盐分胁迫将不利于根系生长,进而造成根冠比下降。

3.2 盐胁迫对油莎豆叶片渗透调节物质的影响

渗透胁迫是植物暴露于盐渍土壤时的主要胁迫,它会造成植物的生理干旱[34],直接影响植物的生长。植物为了抵御盐累积所造成的渗透胁迫,通过可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等渗透调节物质积累以提高细胞的渗透调节能力,维持植物的正常吸水和代谢活动[35-37]。脯氨酸是一种优质的具有渗透调节功能的氨基酸,可有效缓解盐胁迫伤害,维持膜结构稳定性[38]。可溶性蛋白是参与各种代谢的酶类,具有保护植物细胞膜和代谢相关酶类的功能[37]。可溶性糖是合成其他有机溶质的碳架和能量来源,对细胞膜和原生质胶体起稳定作用[39]。本研究表明,在盐胁迫30 d后,各盐分处理下油莎豆叶片脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量均高于CK,但是随盐分胁迫程度加剧脯氨酸含量增加最明显,可溶性糖先显著增加而后又降低,可溶性蛋白变化却不明显。这表明在盐胁迫早期油莎豆主要通过叶片脯氨酸大量积累来减轻盐胁迫。随胁迫时间延长,脯氨酸含量随盐胁迫程度增强先显著下降而后又显著增加,可溶性糖含量则显著增加到一定水平后变化不明显,可溶性蛋白则呈线性显著增加趋势。可以看出,长时间盐胁迫后油莎豆主要通过可溶性蛋白和可溶性糖的大量累积来提高其渗透调节能力,在高盐条件下脯氨酸也会出现大量累积。大多研究表明,随着盐分胁迫程度加剧,脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量呈上升趋势[13,40],但也有研究发现,盐浓度过高时三者均会出现下降[15,27],这与本研究中可溶性糖的变化趋势一致。有研究认为,这主要是不同有机渗透调节物质对盐胁迫的响应差异,可能与各自贡献率不同相关[41]。长时间的盐胁迫导致植物累积了更多的有害物质,需要合成更多的酶类加以清除[42],因此在盐胁迫50 d后可溶性蛋白在细胞渗透调节中起到了更大的作用,成为油莎豆叶片中主要的渗透调节物质,这与对石竹(*Dianthus chinensis*)[13]的研究结果一致。此外,该时段重度盐胁迫(S_4)下过氧化产物MDA的大量累积也反映了油莎豆的细胞膜受到了严重损伤和破坏,所以脯氨酸含量急剧升高,可能是叶片需要累积更多的脯氨酸来维持膜结构的稳定。据此也说明,油莎豆在盐胁迫条件下具有较强的渗透调节能力。

3.3 盐胁迫对油莎豆植株Na^+、K^+含量及Na^+/K^+的影响

Na^+和K^+代谢是植物适应盐渍环境非常重要的生理代谢活动,若打破它们之间的平衡,将对生理作用产生不良影响。Na^+对于大多数植物而言是有害的,其过量吸收会引起植物的渗透胁迫,并会抑制K^+吸收[43],降低酶活性,扰乱细胞代谢过程[44]。K^+则参与了细胞膨压的控制,光合代谢和酶活化,其含量的下降会导致植株生长减缓[45]。本研究表明,随盐分胁迫程度加剧,油莎豆幼苗叶片和根系Na^+含量均显著增加,K^+含量则显著下降,这与大多数研究结果一致[43,46]。本研究还发现,叶片中K^+含量要高于根系,且在中、高度胁迫时叶片和根系K^+含量均维持在一个相对稳定的水平,这说明油莎豆对K^+具有较强的选择性吸收能力。盐胁迫下将更多的

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

K^+运输至叶片中,有利于降低叶片中的渗透胁迫[47],同时还有脯氨酸、可溶性蛋白等渗透调节物质的累积,减缓了植物细胞的失水趋势,所以在高盐胁迫下油莎豆叶片的相对含水量也比较稳定(图3)。因此,适宜的K^+累积在一定程度上能够增强油莎豆的生长适应能力。

Na^+/K^+比是衡量植物耐盐能力的重要的指标,维持适宜的Na^+/K^+比是植物保障气孔正常功能和一些生理代谢的必要前提,为此Na^+/K^+比可作为反映植物组织盐离子伤害的一个典型指标[48]。较低的Na^+/K^+比通常意味着更强的耐盐能力,耐盐植物往往会吸收足够的K^+含量来应对盐害[49],本研究中,随NaCl浓度的升高,叶片和根系的Na^+/K^+比也显著增大,说明细胞质中Na^+增加的同时K^+外渗,离子平衡遭到破坏,油莎豆生长受到抑制,这与大多研究结果一致[40]。随盐胁迫时间的延长,中度和重度盐胁迫下根系与叶片的Na^+/K^+比均有不同程度增加。这表明盐胁迫时间越长,Na^+/K^+比越难维持在合适植物生长的范围,这主要与Na^+在油莎豆细胞质中的积累也越严重有关。因此,轻度盐胁迫可能更有利于油莎豆幼苗生长。

3.4 基于隶属函数的盐胁迫下油莎豆耐盐性评价

植物耐盐性会受到多种因素的共同影响,单独选取某一指标进行耐盐性评价会使评价结果片面化,利用模糊数学隶属函数评定油莎豆耐盐性,有助于消除评价结果的局限性[50]。综合评价表明,油莎豆在沙质土壤不同程度盐胁迫下的耐盐性大小为:$CK > S_1 > S_2 > S_3 > S_4$,且CK与$S_1$差异不明显。可以看出,油莎豆的耐盐性随盐胁迫程度加剧而降低。轻度盐胁迫下油莎豆的适应性很强,且有良好的的生长表现。盐胁迫50 d的耐盐性评价值在各处理之下均低于盐胁迫30 d,说明在沙质土壤中长时间的盐胁迫不利于油莎豆幼苗生长。盐渍化土壤中盐化和碱化相伴而生,有研究发现,轻度盐渍化沙质土壤更利于油莎豆种子出苗[51],但在偏碱性沙质土壤中也能正常生长[52]。本研究中培育油莎豆幼苗的沙土也偏碱性,油莎豆幼苗在沙土轻度盐胁迫下生长良好的主要原因可能是因为碱性环境对低盐胁迫有缓解作用[53]。此外,砂质土壤土质疏松,对油莎豆根系和块茎的生长及后期收获都十分有利[54],因此油莎豆是可以在新疆沙质轻度盐渍化土地和沙质偏碱性轻度盐渍化土壤进行推广种植。

4 结 论

通过研究不同浓度盐胁迫下油莎豆幼苗的生长发育变化及生理响应,探讨了油莎豆作为经济作物被种植于沙质盐渍化土壤中的可行性,综合油莎豆在盐胁迫下各生长及生理指标发现:

(1) 轻度盐胁迫处理的($\leq 0.5\ g\cdot kg^{-1}$)油莎豆幼苗地上和地下部均生长良好,但随胁迫程度加剧和胁迫时间延长明显受到抑制。

(2) 油莎豆幼苗在盐胁迫早期主要通过脯氨酸的大量积累来减轻盐胁迫,在后期主要通过可溶性蛋白和可溶性糖的大量累积来提高其渗透调节能力。随盐胁迫程度的加剧,油莎豆幼苗体内叶片和根系Na^+含量和Na^+/K^+比均显著增加,K^+含量则显著下降,且下降到一定程度时维持在一个相对稳定的水平。

(3) 大量渗透调节物质的累积使盐胁迫下叶片的相对含水量变化较小。表明油莎豆幼苗可通过保持较高的叶片持水能力和渗透调节能力来适应沙质土壤的盐胁迫,但高盐胁迫不宜持续过长时间。本研究对油莎豆在新疆沙质盐渍化土地的推广种植具有重要指导意义。

参考文献(References):

[1] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10−27. [Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Wang Xiangping, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 59(1): 10−27.]

[2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30−34, 2, 4. [Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Wang Xiangping, et al. Halt soil salinization, boost soil productivity[J]. Science, 2021, 73(6): 30−34, 2, 4.]

[3] 胡明芳, 田长彦, 赵振勇, 等. 新疆盐碱地成因及改良措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 111−117. [Hu Mingfang, Tian Changyan, Zhao Zhenyong, et al. Salinization causes and research progress of technologies improving saline-alkali soil in Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2012, 40(10): 111−117.]

[4] 云雪雪, 陈雨生. 国际盐碱地开发动态及其对我国的启示[J]. 国土与自然资源研究, 2020(1): 84−87. [Yun Xuexue, Chen Yusheng. International development of saline-alkali land and its enlightenment to China[J]. Territory & Natural Resources Study, 2020(1): 84−87.]

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

[5] 阳振乐. 油莎豆的特性及其研究进展[J]. 北方园艺, 2017(17): 192-201. [Yang Zhenle. Characteristics and research progress of *Cyperus esculentus*[J]. Northern Horticulture, 2017(17): 192-201.]

[6] Pascual B, Maroto J V, López-Galarza S, et al. Chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.): An unconventional crop. Studies related to applications and cultivation[J]. Economic Botany, 2000, 54(4): 439-448.

[7] 杨敏, 田丽萍, 薛琳. 不同油莎豆品种在新疆干旱气候区的产量表现与品质差异[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(4): 451-454. [Yang Min, Tian Liping, Xue Lin. Quality and production potential of different chufa varieties in arid climate region of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(4): 451-454.]

[8] 刘亚兰, 赵月, 徐梦琦, 等. 极端干旱区种植行距对油莎豆生长及土壤特性的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2486-2493. [Liu Yalan, Zhao Yue, Xu Mengqi, et al. Effect of row spacing on the growth of *Cyperus esculentus* and soil properties in extremely arid region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(11): 2486-2493.]

[9] 齐琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2020, 18(8): 2741-2746. [Qi Qi, Ma Shurong, Xu Weidong. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(8): 2741-2746.]

[10] Zelm E V, Zhang Y, Testerink C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2020, 71: 403-433.

[11] 蔡晓锋, 胡体旭, 叶杰, 等. 植物盐胁迫抗性的分子机制研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 134-141. [Cai Xiaofeng, Hu Tixu, Ye Jie, et al. Molecular mechanisms of salinity tolerance in plants[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(3): 134-141.]

[12] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(6): 371-379.

[13] 黄勇, 郭猛, 张红瑞, 等. 盐胁迫对石竹种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(12): 105-111. [Huang Yong, Guo Meng, Zhang Hongrui, et al. Effects of salt stress on seed germination and seedling growth of carnation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(12): 105-111.]

[14] 豆昕桐, 王英杰, 王华忠, 等. 耐盐和盐敏感型小麦品种对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性差异[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4976-4992. [Dou Xintong, Wang Yingjie, Wang Huazhong, et al. Physiological response and tolerance difference of two wheat varieties to NaCl stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4976-4992.]

[15] 杨发荣, 刘文瑜, 黄杰, 等. 不同藜麦品种对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 草业学报, 2017, 26(12): 77-88. [Yang Farong, Liu Wenyu, Huang Jie. et al. Physiological responses of different quinoa varieties to salt stress and evaluation of salt tolerance[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 77-88.]

[16] 贾茵, 向元芬, 宋宜霖, 等.小报春幼苗对NaCl胁迫及外源钙缓解的生理响应[J]. 中国草地学报, 2022, 44(1): 10-19. [Jia Yin, Xiang Yuanfen, Song Yilin. et al. Physiological responses of *Primula forbesii* seedings to NaCl stress and alleviation effect of exogenous calcium[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(1): 10-19.]

[17] 唐榕, 梁培鑫, 郭晨荔, 等. 盐碱胁迫对油莎豆幼苗生长和生理性状的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(3): 528-533. [Tang Rong, Liang Peixin, Guo Chenli, et al. Effect of saline-alkali stress on growth, physiological characteristics of *Cyperus esculentus*[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(3): 528-533.]

[18] 买买提江·赛提尼牙孜, 曼吾拉·卡德尔. 新疆地区近30年气候变化特征分析及预测[J]. 南方农机, 2020, 51(17): 90-91. [Saitiniyazi M, Kadeer M. Analysis and prediction of climate change characteristics in Xinjiang in recent 30 years[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2020, 51(17): 90-91.]

[19] 黄绍文, 高伟, 唐继伟, 等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 965-977. [Huang Shaowen, Gao Wei, Tang Jiwei, et al. Total salt content and ion composition in tillage layer of soils in the main vegetable production regions of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(4): 965-977.]

[20] 弋良朋, 王祖伟. 盐胁迫下3种滨海盐生植物的根系生长和分布[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1195-1202. [Yi Liangpeng, Wang Zuwei. Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1195-1202.]

[21] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 11-12. [Zou Qi. Instructional on Plant Physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 11-12.]

[22] Kosugi H, Kikugawa K. Thiobarbituric acid reaction of aldehydes and oxidized lipids in glacial acetic acid[J]. Lipids, 1985, 20(12): 915-921.

[23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 195-197, 258-260. [Li Hesheng. Experimental Principle and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 195-197, 258-260.]

[24] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 54-55. [Li Ling. Experimental Guidance of Plant Physiology Module[M]. Beijing: Science Press, 2009: 54-55.]

[25] 王宝山, 赵可夫. 小麦叶片中Na, K提取方法的比较[J]. 植物生理学通讯, 1995, 31(1): 50-52. [Wang Baoshan, Zhao Kefu, Comparison of extractive methods of Na and K in wheat leaves[J]. Plant physiology Communications, 1995, 31(1): 50-52.]

[26] Liu B, Kang C, Wang X, et al. Physiological and morphological responses of *Leymus chinensis* to saline-alkali stress[J]. Grassland science, 2015, 61(4): 217-226.

[27] 陆安桥, 张峰举, 许兴, 等. 盐胁迫对湖南稷子苗期生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(5): 84-93. [Lu Anqiao, Zhang Fengju, Xu Xing, et al. Effects of salt stress on growth and physiological characteristics of *Echinochloa frumentacea* seedlings [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(5): 84-93.]

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202301.00138v1

[28] 徐静, 董宽虎, 高文俊, 等. NaCl和Na_2SO_4胁迫下冰草幼苗的生长及生理响应[J]. 中国草地学报, 2011, 33(1): 36−41. [Xu Jing, Dong Kuanhu, Gao Wenjun, et al. Growth and physiological responses of *Agropyron cristatum* seedlings under NaCl and Na_2SO_4 stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(1): 36−41.]

[29] 毛爽, 周万里, 杨帆, 等. 植物根系应答盐碱胁迫机理研究进展[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(10): 1991−2000. [Mao Shuang, Zhou Wanli, Yang Fan, et al. Research progress on mechanism of plant roots response to salt-alkali stress[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 30(10): 1991−2000.]

[30] 雷春英, 吉小敏, 彭钼植, 等. 不同类型盐分对盐爪爪种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1436−1441. [Lei Chunying, Ji Xiaomin, Peng Muzhi, et al. Effect of sodium salinity stress type on the germination of *Kalidium foliatum* seeds and its young seedling growth[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1436−1441.]

[31] Mauchamp A, Mésleard F. Salt tolerance in *Phragmites australis* populations from coastal Mediterranean marshes[J]. Aquatic Botany, 2001, 70(1): 39−52.

[32] Salter J, Morris K, Bailey P C E, et al. Interactive effects of salinity and water depth on the growth of *Melaleuca ericifolia* Sm. (Swamp paperbark) seedlings[J]. Aquatic Botany, 2007, 86(3): 213−222.

[33] 王树凤, 胡韵雪, 孙海菁, 等. 盐胁迫对2种栎树苗期生长和根系生长发育的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1021−1029. [Wang Shufeng, Hu Yunxue, Sun Haiqing, et al. Effects of salt stress on growth and root development of two oak seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 1021−1029.]

[34] 孟繁昊, 王聪, 徐寿军. 盐胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2014, 29(3): 315−318, 373. [Meng Fanhao, Wang Cong, Xu Shoujun. Advances in research on effects of salt stress on plant and the mechanism of plant salt tolerance[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Science Edition), 2014, 29(3): 315−318, 373.]

[35] Mišić D, Šiler B, Nestorović Živković J, et al. Contribution of inorganic cations and organic compounds to osmotic adjustment in root cultures of two *Centaurium* species differing in tolerance to salt stress[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2012, 108(3): 389−400.

[36] Arndt S K, Arampatsis C, Foetzki A, et al. Contrasting patterns of leaf solute accumulation and salt adaptation in four phreatophytic desert plants in a hyperarid desert with saline groundwater[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59(2): 259−270.

[37] 张娅, 施树倩, 李亚萍, 等. 不同盐胁迫下小麦叶片渗透性调节和叶绿素荧光特性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4381−4390. [Zhang Ya, Shi Shuqian, Li Yaping, et al. Osmotic regulation and chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of wheat seedlings under different salt stresses[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4381−4390.]

[38] Xu Y, Xiao H Y, Zheng N J, et al. Progress on responding of free amino acid in plants to salt stress[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39: 40−47.

[39] 高茜, 李毅, 苏世平, 等. 盐胁迫对红砂(*Reaumuria soongorica*)种子吸胀过程中生理特性的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 83−87. [Gao Qian, Li Yi, Su Shiping, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics of *Reaumuria soongorica* seeds during Imbibition[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 83−87.]

[40] 李茹玉, 柴薇薇, 郭晓农, 等. 盐处理对罗布麻(*Apocynum venetum*)幼苗渗透调节的影响[J]. 分子植物育种, 2020, 18(12): 4105−4110. [Li Ruyu, Chai Weiwei, Guo Xiaonong, et al. Effect of salt treatment on osmotic adjustment of *Apocynum venetum* seedlings[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(12): 4105−4110.]

[41] 王娟, 李德全. 逆境条件下植物体内渗透调节物质的积累与活性氧代谢[J]. 植物学通报, 2001(4): 459−465. [Wang Juan, Li Dequan. The accumulation of plant osmoticum and activated oxygen metabolism under stress[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001(4): 459−465.]

[42] Rehman S, Harris P J C, Bourne W F. The effect of sodium chloride on the Ca^{2+}, K^+ and Na^+ concentrations of the seed coat and embryo of *Acacia tortilis* and *A. coriacea*[J]. Annals of Applied Biology, 1998, 133(2): 269−279.

[43] 王新英, 史军辉, 刘茂秀, 等. 四翅滨藜主要渗透调节物质对NaCl胁迫累积的响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 621−627. [Wang Xinying, Shi Junhui, Liu Maoxiu. et al. Response of main osmotic adjustment substances to NaCl stress accumulation in *Atriplex canescens*[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 621−627.]

[44] Flowers T J, Munns R, Colmer T D. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes[J]. Annals of botany, 2015, 115(3): 419−431.

[45] 赵映雪. NaCl胁迫对沙葱幼苗根和叶片生理生化基础的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [Zhao Yingxue. Effects of NaCl Stress on Physiological and Biochemical Basis of Root and Leaf of *Allium mongolicum* Regel Seedings[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.]

[46] 姜瑛, 周萌, 吴越, 等. 不同燕麦品种耐盐性差异及其生理机制[J]. 草业科学, 2018, 35(12): 2903−2914. [Jiang Ying, Zhou Meng, Wu Yue. et al. Evaluation of salt tolerance and its underlying physiological mechanisms in different oats[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(12): 2903−2914.]

[47] 郭瑞, 李峰, 周际, 等. 亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 69−79. [Guo Rui, Li Feng, Zhou Ji, et al. Eco-physiological responses of linseed (*Linum usitatissimum*) to salt and alkali stresses[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 69−79.]

[48] 刘玲, 罗剑洪, 李丙文, 等.咸水滴灌对肉苁蓉寄生体系盐离子分配及品质的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 908−915. [Liu

ChinaXiv合作期刊

Ling, Luo Jianhong, Li Bingwen, et al. Effect of saline water drip irrigation on salt ions distribution for the *Haloxylon ammoedndron-Cistanche deserticola* association (H-C association) and quality of *Cistanche deserticola* Ma[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 908–915.]

[49] Maathuis F J M, Amtmann A. K^+ nutrition and Na^+ toxicity: the basis of cellular K^+/Na^+ ratios[J]. Annals of Botany, 1999, 84(2): 123–133.

[50] 田小霞, 卫晓锋, 魏浩, 等. 6种牧草苗期耐旱性综合评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 978–985. [Tian Xiaoxia, Wei Xiaofeng, Wei Hao, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of six forage species at the seedling stage[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 978–985.]

[51] 王子臣, 张兵, 管永祥, 等. 油莎豆盐土栽培生理初探[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1126–1131. [Wang Zichen, Zhang Bing, Guan Yongxiang, et al. Study on physiology of chufa cultivation in solonchak [J]. Soils, 2017, 49(6): 1126–1131.]

[52] 徐接亮, 张凤华, 李变变, 等. 施肥对油莎豆根际微生物群落特性的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1741–1749. [Xu Jieliang, Zhang Fenghua, Li Bianbian, et al. Effect of fertilization on the characteristics of soil microbial community in the rhizosphere of *Cyperus esculentus* in the sandy area of Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1741–1749.]

[53] 王艺臻, 丁国栋, 崔欣然, 等. 盐碱复合胁迫对油沙豆生长和光合特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(5): 146–152. [Wang Yizhen, Ding Guodong, Cui Xinran, et al. Effects of saline-alkali stress on the growth and photosynthetic characteristics of *Cyperus esculentus* and the responses of protective enzymes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(5): 146–152.]

[54] 张小燕. 油莎豆的主要高产栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2009, 38(6): 165–166. [Zhang Xiaoyan. Main high-yield cultivation techniques of *Cyperus esculentus*[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2009, 38(6): 165–166.]

chinaXiv:202301.00138v1

ChinaXiv合作期刊

To simulate the growth and physiological responses of *Cyperus esculentus* seedlings to salt stress in sandy soil

MA Xingyu[1,2,3,4], HUANG Caibian[1,2,3], ZENG Fanjiang[1,2,3], LI Xiangyi[1,2,3], ZHANG Yulin[1,2,3,5], DING Ya[1,2,3,5], GAO Yanju[1,2,3,4], XU Mengqi[1,2,3,4]

(1. Xinjiang Desert Plant Roots Ecology and Vegetation Restoration Laboratory, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Cele National Station of Observation and Research for Desert Grassland Ecosystem in Xinjiang, Cele 848300, Xinjiang, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: To investigate the growth and physiological responses of *Cyperus esculentus* to salt stress in wind-sand soil, a pot experiment with eolian sandy soil as the growth medium was conducted to examine the effects of different degrees of salt stress (NaCl solution) on the growth, physiological and biochemical characteristics, and the balances of Na^+ and K^+ in root and leaves in a greenhouse on days 30 and 50 of stress exposure. The results showed that: (1) When the NaCl concentration was ≤0.5 g·kg^{-1}, both the aboveground and underground dry weights of *C. esculentus* seedlings were significantly unaffected. However, plant height declined significantly compared with the non-stress seedlings. When NaCl the concentration was ≥1.0 g·kg^{-1}, the dry weights of aboveground and underground, plant height, and leaf area decreased significantly with stress time. (2) On day 30, under salt stress, the proline content increased significantly with the NaCl concentration, but soluble and protein contents increased slightly. However, MDA content increased significantly under 0.5 g·kg^{-1} NaCl treatment and decreased significantly with increasing NaCl concentration. Under salt stress on day 50, as the NaCl concentration increased, the soluble protein content increased significantly. Then, soluble sugar content increased significantly firstly and then remained stable, while the contents of proline and MDA only increased significantly at 3.5 g·kg^{-1} NaCl. (3) The Na^+ content and Na^+/K^+ in leaves and roots increased significantly as the NaCl concentration increased, while the K^+ content decreased significantly and then remained stable when the NaCl concentration was > 1.0 g·kg^{-1}. These results suggest that increased proline content at the early growth stage, while increased contents of soluble protein and sugar at the late growth stage, contribute to increasing the osmotic adjustment and water-holding capacity and decreasing the MDA content and K^+ loss, improving the salt tolerance of *C. esculentus* in sandy soil. The comprehensive evaluation results showed that when the NaCl concentration was ≤0.5 g·kg^{-1}, no effect of salt stress on the growth of *C. esculentus* seedling was found, while the plant growth was inhibited significantly when the concentration was >1.0 g·kg^{-1}.

Keywords: *Cyperus esculentus*; salt stress; growth of seedlings; osmotic adjustment; ion content

chinaXiv:202301.00138v1